

引用本文:葛瑞林,江亮,陈铭毓,等. 基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 59–63.

基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法

葛瑞林, 江 亮, 陈铭毓, 沈建华*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 为了有效降低弹性光网络的频谱碎片程序和阻塞率, 提出一种基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法。首先, 对弹性光网络建立图着色模型, 将频谱分配问题转化为带权值的图上色问题, 然后提出了 2 种改进的上色算法(链式搜索法和改进的贪心算法)。仿真结果表明: 与度最大着色算法相比, 改进的 2 种上色算法能更好地优化频谱资源并降低平均链路阻塞率。

关键词: 弹性光网络; 频谱分配; 图着色模型; 贪心算法; 算法设计

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0059-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spectrum allocation algorithm for elastic optical networks based on graph coloring model

GE Ruilin, JIANG Liang, CHEN Mingyu, SHEN Jianhua*

(School of communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjin 210003, China)

Abstract: In order to effectively reduce frequency spectrum fragmentation and blocking probability in elastic optical networks, a spectrum allocation algorithm based on graph coloring model is proposed. Firstly, a graph coloring model is established for elastic optical networks, and the spectrum allocation problem is transformed into a graph coloring problem with weights. Then, two improved coloring algorithms (chain search method and improved greedy algorithm) are proposed. The simulation results show that compared with the degree maximum coloring algorithm, the two improved coloring algorithms can better optimize the spectrum resources and reduce the average blocking probability.

Key words: elastic optical network, spectrum allocation, graph coloring model, greedy algorithm, algorithm design

0 引言

互联网的快速发展使得网络业务的种类和数量持续快速地增长, 对基础承载光网络的带宽供给能力提出了更高的要求。传统的波分复用(WDM)光网络以固定栅格波长作为最小颗粒度进行业务带宽分配, 在动态复杂且多样性的业务环境下, 难以适应不同颗粒度的业务请求, 导致其频谱利用率较低和网络灵活度差。在此背景下, 弹性光网络(EON)应运而生, 被认为是下

收稿日期: 2022-06-15。

作者简介: 葛瑞林(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息系统专业, 主要研究方向为弹性光网络的路由选择和频谱分配。参与了南京邮电大学横向科研课题“新一代智能 SD-WAN 体系架构及其关键技术”研发。

通信作者: 沈建华(1972—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为高速大容量光纤通信系统、智能光网络、宽带接入网和 IP 网络技术等。



一代光网络的主要发展方向之一^[1]。

由于频谱的动态分配和释放会导致频谱碎片化, 影响后续服务的分配和网络的频谱资源利用率。因此, 路由和频谱分配(RSA)^[2]成为 EON 中的关键问题。

图论是数学中重要的一个分支, 通信网络中的选路、资源分配、生存性等问题都可以转换为图论中的上色问题来加以解决^[3]。图论中上色问题的目标是最使用最少的颜色完成对图的着色, 这与 EON 中频谱分配使用最小资源的目的是一致的。近年来, 一些研究者开始尝试用图论方法来解决频谱分配问题。文献[4–5]提出了在认知无线电频谱分配中引入图着色模型, 并证明了图论方法具有更好的鲁棒性。文献[6]对颜色敏感的图论着色算法进行了优化, 提高了算法的频谱利用率。FADINI W 等人^[7]提出了一种基于频谱着色分类的思路, 形成了图着色模型。上述文献虽然针对图论在频谱分配中的应用开展了不少研究, 但是仍存在许

葛瑞林,江亮,陈铭毓,等. 基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法

多尚待解决的问题,比如如何选取适宜的着色算法和在算法中设置合适的指标来提升网络的性能等。本文基于 EON 的图着色模型提出 2 种 RSA 改进的着色算法,有效降低网络的频谱碎片程度和阻塞率。

1 基于图着色模型的 RSA 策略

RSA 中的频谱分配需满足 3 个条件:连续性、一致性、不可重叠性^[8]。为了满足这 3 个条件,本文引入图着色模型(下文简称图模型)。

首先,需要建立 1 个图,其具体步骤如下:

①把每一个到达的网络业务视为一个“点”;

②每一个网络业务需要的频隙即为对应点需要上色的色数,称为该点的权重;

③如果 2 个网络业务之间有公共的路由,则将这 2 个点连起来,即形成“边”,这样就建立了 1 个图(包含点和边)。

假设某时间点有 6 个网络业务到达,具体业务布置如表 1 所示。图模型如图 1 所示。每个点圈内的数字为每个业务需要的频隙数,即为该点的权重,

表 1 简单网络拓扑的业务布置

业务序号	源节点	目的节点	路由	所需频隙数
1	2	3	2-1-3	3
2	2	1	2-1	4
3	1	4	1-4	2
4	1	2	1-4-2	5
5	1	4	1-3-4	2
6	3	2	3-4-2	2

然后,对这个图进行上色,即每个点按照其权重来上色,如一个点的权重是 4,则需要给该点分配 4 种

颜色,且相连的 2 个点不能使用重复的颜色。一种上色结果为业务 1 使用颜色 1、2、3;业务 2 使用颜色 4、5、6、7;业务 3 使用颜色 1、2;业务 4 使用颜色 3、4、5、6、7;业务 5 使用颜色 4、5;业务 6 使用颜色 1、2。这里保证了相邻业务颜色不重复,且每个点的颜色是连续的,即满足了频谱分配的不可重叠性和连续性的要求。

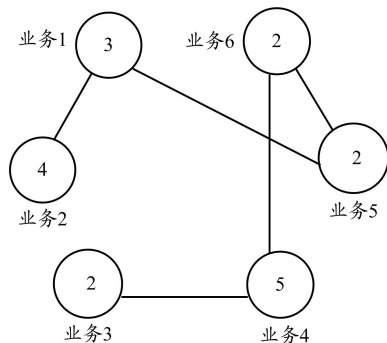


图 1 图模型

在上述上色方案中,不同颜色对应链路中频谱资源的索引,例如业务 1 上色的颜色是 1、2、3,即给业务 1 分配链路中索引为 1、2、3 的频谱资源,业务 1 的路由是 2-1-3,那么 2-1 和 1-3 这 2 条链路中前 3 个频谱资源分配给了业务 1。上色时,使用尽可能少的颜色满足频谱分配中节约频谱资源、尽可能产生小的频谱碎片的要求。因此,在图论中,需要采用合适的着色算法解决频谱分配问题。

2 着色算法

在建立了上述图模型后,本文针对传统着色算法存在的问题进行分析和改进,并完成最后的上色。文献[9]对频谱分配问题采用了图模型,随后采用整数线性规划的方法上色,但是该算法的设计已经脱离了图论,计算非常复杂。文献[10]提出度最大着色算法,考虑在图模型中按照每一个点的度的大小依次上色(在图论中,一个点的度指图中与该点相连的边数),虽然该算法实现较简单,但是其性能还需要进一步提升。本文设计适用于 RSA 图模型的着色算法,在降低上色复杂度的同时又能保证均衡的性能。

目前,在图论中应用相对较成熟的着色算法有回溯算法和贪心算法,但是经典图论中的着色算法不能简单移植用于 EON 中的频谱分配,主要原因分析如下:

①经典图论中,上色是每一个顶点使用一种颜色,已有的上色算法也是基于一个点上一种颜色;而在 EON 中频谱分配采用的着色模型是一个顶点需要使用多种颜色,即在前一节中引入的某个点需要的色数称为权重,现在的着色问题可以称为带权值的图着色问题。显然,如果每个点的权重都赋为 1,则着色问题可以退化成经典图论中的着色问题。

②经典图论中,上色问题中的颜色是没有顺序的,即对一个点用红色、绿色,还是蓝色,并没有严格限制,只要最终完成上色的任务即可;而在 EON 图模型中,由于颜色对应的是频谱资源,不仅要完成上色,还要保证颜色的使用尽可能满足一定的规则。

对于第一个问题,本文通过在选取颜色的时候引入颜色区间的概念加以解决,即使用一个区间来给一个点上色,而不是传统的一个数。例如,当一个点的权重为 4,即需要 4 种颜色,可以使用颜色区间[1,4]表示使用 1、2、3、4 这 4 种颜色。如果条件允许也可以用[2,5]表示使用 2、3、4、5 这 4 种颜色。这样就满足了频谱分配一致性的原则,即分配的频隙(对应此处的颜色)是连续的。

对于第二个问题,本文考虑引入首次命中(FF)法则^[2,11],即对一个点上色时,优先使用索引值小的颜色。例如一个点需要3种颜色,则给出的颜色区间是 $[1,3]$,而不是 $[3,5]$ 或者 $[7,9]$ 。按照这样的法则,颜色的使用会尽可能地集中在前面,从而使得出现的频谱碎片尽可能少。

本文按照上面2种解决思路对传统图论中的回溯算法和贪心算法进行改进,以适用与EON中图模型。考虑到回溯算法其本质可以认为是穷举法,即在该算法中,选取一个点上色,然后选取该点的一个相邻的点作为下一个点。基于这种链式搜寻的思路,当使用FF法则时,优先考虑的是上色的规则,即按什么顺序去给每一个点上色。本文提出链式搜索法,即改进的回溯算法,其实现步骤如下:

步骤一:所有节点起初均没有上色,将所有节点按照度降序排列,度相同的按权重降序比较,最后将排好序的所有节点放在列表L中。

步骤二:从列表L中取出一个节点(即所有没有上色点中,度最大的点),如果不存在该点,则算法结束。

步骤三:对于选出的点上色,并将该点从列表L中去除。

步骤四:考虑与步骤三中上色的点相连且没有上色的点,选取一个度最大的点(度相同选取权重最大的点),执行步骤三;如果找不到,则执行步骤二。

在贪心算法中,选取一个点上色,然后选取该点的不相邻点集,基于这种跳跃搜寻的思路,本文提出改进的贪心算法,实现步骤如下:

步骤一:检查所有没有上色的点,组成一个集合S,若为空集则结束。

步骤二:对集合S中度最大的点上色,同时由这个点生成一个同色集(与这个点不相邻的点组成的集合),将这个同色集命名为新的集合S。反复执行步骤二,当S为空集,执行步骤一。

以上2种改进算法中,根据一个点上色时该点的权重,需尽可能使用索引小的颜色区间;同时,改进的贪心算法相对链式搜索算法的复杂度更低。

3 仿真实验和性能分析

为验证所提出的2种图模型改进算法的性能,本文在具有14个节点、21条链路的NSFNET网络,以及具有23个节点、43条链路的USNET网络中进行仿真实验。仿真中,每根光纤上的总频谱带宽设置为4 THz,链路上单个频隙的带宽设为12.5 GHz,即每条

光纤链路的频隙数为320个。加上2个频隙单位的保护带宽,设置每个网络业务所需频隙为3~15个。网络业务的源节点和目的节点随机产生。由于仿真验证的是频谱分配性能,因此统一采用Dijkstra算法计算最短路由。

业务的到达是一个到达率为 λ 的泊松过程,而每个业务的持续时间服从 $1/\mu$ 的负指数分布,即网络业务不断到达然后释放。其中, μ 为负指数分布率参数,即单位时间内事件发生的次数。固定 μ 的值为1,不断增加 λ 的值,模拟网络环境中业务接入不断繁忙的过程。在不同的网络负载下,历经10个时间点后,采用本文提出的图模型改进的2种着色算法进行频谱分配,并从频谱碎片程度、频谱利用率、阻塞率等几个方面与度最大着色算法进行比较^[10]。

频谱碎片程度 F_{ext} 定义为

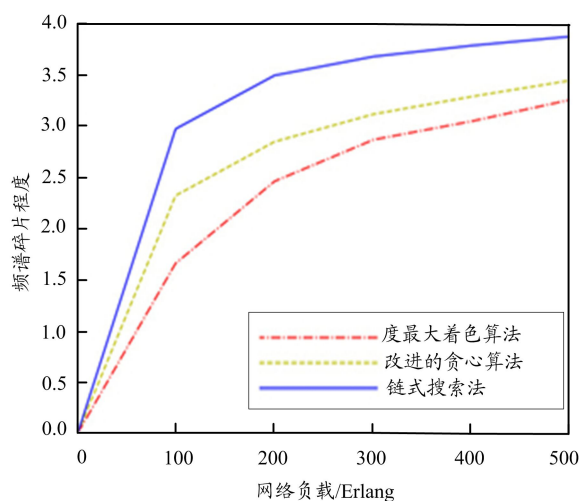
$$F_{\text{ext}} = 1 - \frac{F_{\text{max}}}{N_{\text{fre}}} \quad (1)$$

其中, N_{fre} 表示链路中所有空闲的频隙, F_{max} 表示空闲频隙中最大的连续频隙的长度。已知 $F_{\text{ext}} \in [0, 1]$,当其值越靠近0时表示网络的频谱碎片程度小,而越靠近1则表示频谱碎片程度越高。频谱利用率定义为被占用的频隙除以所有可用频隙。频谱碎片程度和频谱利用率共同反应了频谱优化程度,频谱碎片程度越低、频谱利用率越高,说明频谱优化程度高。频谱平均链路阻塞率 B 定义为

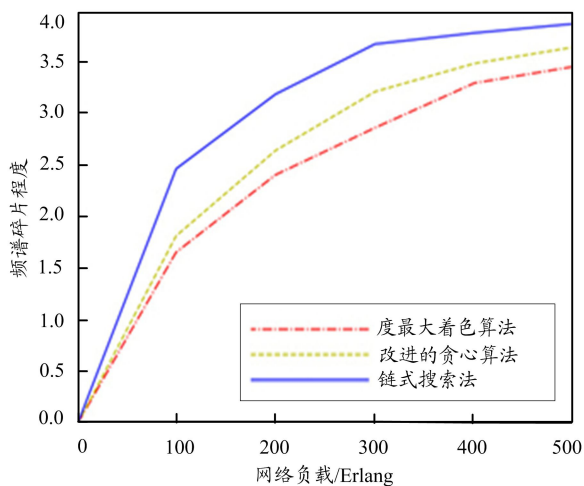
$$B = \frac{\sum_{i \in P} R_i t_i}{\sum_{i \in T} R_i t_i} \quad (2)$$

其中, R_i 表示第 i 个业务需要的频隙, t_i 为第 i 个业务的持续时间。集合 T 存放所有业务的序号,集合 P 存放所有被阻塞业务的序号。在不同网络负载下,3种算法的频谱碎片程度、频谱利用率和阻塞率的性能对比情况如图2~图4所示。

通过对比可知,改进的2种算法比传统度最大着色算法的分配频谱在频谱优化程度和阻塞率上明显提高,这是因为图论中上色原则是尽可能使用少的颜色,这和频谱分配要求的少的频谱资源是相通的;网络负载在500 Erlang时,改进的贪心算法相比传统度最大着色算法的频谱碎片程度优化了8%,而链式搜索法优化了近17%;改进的2种算法比传统度最大着色算法的频谱利用率高,且阻塞率也平均降低了9%。此外,改进的贪心算法的优化程度小于链式搜索法,

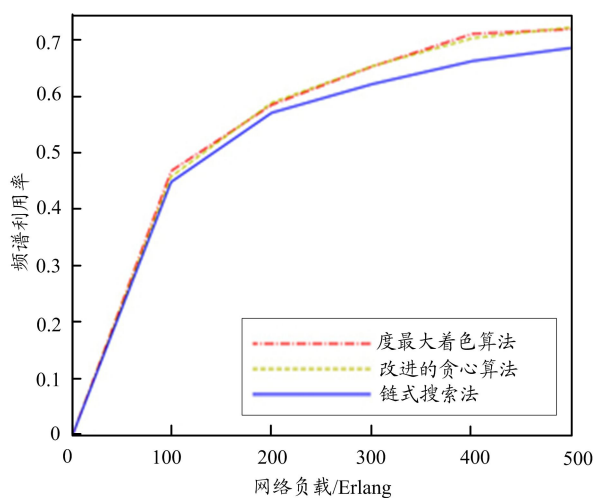


(a) NSFNET

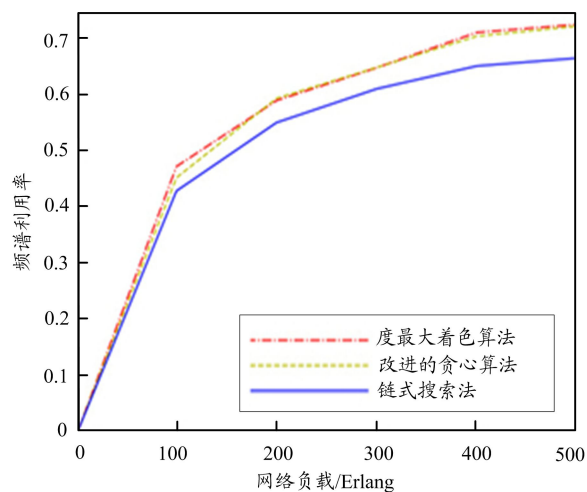


(b) USNET

图2 网络负载和频谱碎片程度关系

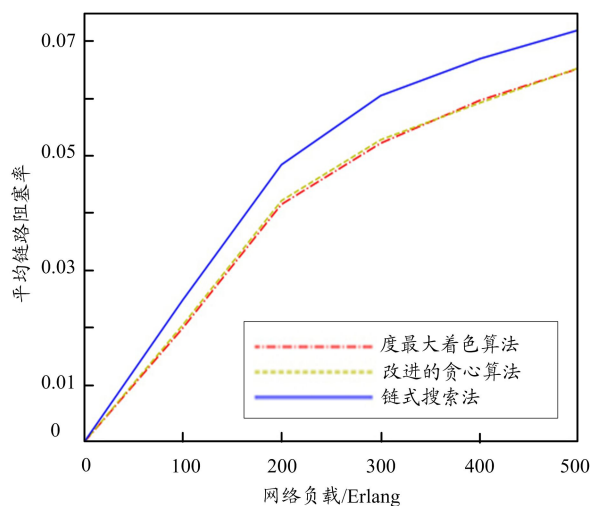


(a) NSFNET

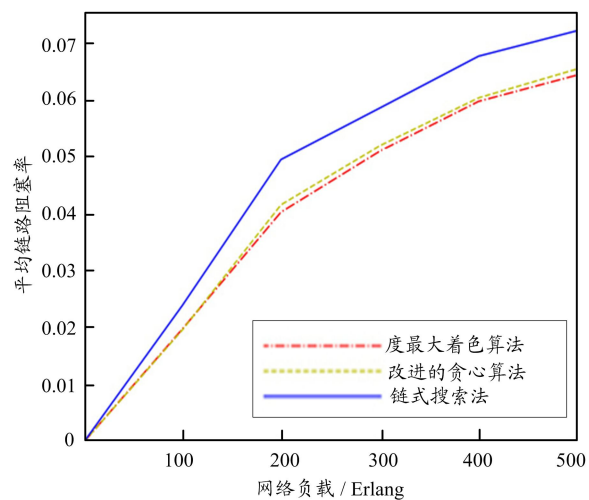


(b) USNET

图3 网络负载和频谱利用率关系



(a) NSFNET



(b) USNET

图4 网络负载和阻塞率关系

这表明该算法只能每步寻找一个局部最优,而无法保证最终结果为全局最优。

综上所述,在以上 2 种网络拓扑中,相对度最大着色算法,本文提出的 2 种改进算法都能不同程度地优化频谱资源和减小阻塞率。此外,链式搜索法在低流量下可以更好地优化网络,性能更好;而改进的贪心算法的性能稍逊但其复杂度低,可以用于不过度要求性能的网络中。

4 结束语

本文针对 EON 中的频谱分配问题,基于图论建立了一种图着色模型,并提出 2 种改进的着色算法,即链式搜索法和改进的贪心算法,完成了对图着色模型的上色(完成了频谱分配的任务)。仿真结果表明:基于图着色模型的 2 种改进算法比传统度最大着色算法的频谱利用率更好、阻塞率更低。其中,改进的贪心算法性能稍逊但是更加简单,运行较快。

参考文献:

- [1] 邱伟. 基于 OFDM 的弹性光网络中 RSA 问题综述[J]. 网络安全技术与应用, 2019(9): 114–117.
- [2] 张佳唯, 钱凤臣, 杨俊强, 等. 弹性光网络中路由与频谱分配算法综述 [J/OL]. 北京: 系统工程与电子技术; 2022 (6): 1–14 [2022–05–10]. <https://www.sys-ele.com/CN/10.12305/j.issn.1001-506X.2022.06.28>.

葛瑞林, 江亮, 陈铭毓, 等. 基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法

- [3] WU Z H, PAN S R, CHEN F W. A comprehensive survey on graph neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(1): 4–24.
- [4] YAO B Y, YIN J H, LI H, et al. Channel resource allocation based on graph theory and coloring principle in cellular networks [C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). Chengdu: IEEE, 2018: 1–9.
- [5] 刘鹏, 张国翊, 舒放, 等. 基于图论的认知无线网络频谱动态分配[J]. 电讯技术, 2020, 60(6): 625–631.
- [6] 瞿越, 鲜永菊, 徐昌彪. 基于用户需求的图着色论频谱分配算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 602–605.
- [7] FADINI W, CHATTERJEE B C, OKI E. A subcarrier-slot partition scheme with first-last fit spectrum allocation for elastic optical networks[J]. Computer Networks, 2015, 91: 700–711.
- [8] CHRISTODOULOPOULOS K, TOMKOS I, VARIGOS E A. Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation [C]//IEEE. Proceedings of IEEE. 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami: IEEE, 2010: 1–6.
- [9] 吴润泽, 秦宇浩, 樊冰. 弹性光网络中基于图着色理论的资源分配算法[J]. 光通信技术, 2021, 45(7): 41–47.
- [10] SINGH S K, JUNKAN A, SINGH S K, et al. Efficient spectrum defragmentation with holding-time awareness in elastic optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(3): B78–B89.
- [11] IRENEUSZ O. Spectrum allocation policy in elastic optical networks [J]. International Journal of Electronics & Telecommunications, 2017, 63(4): 423–429.